

拼装式土工格室挡墙受力变形测试分析

孔永博¹, 李浩^{2*}, 张建伟², 李俊杰¹, 杨晓华²

(1.四川公路桥梁建设集团有限公司 勘察设计分公司,四川 成都 610000;2.长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:以四川成宜高速连接线某试验段变截面土工格室挡墙为工程依托,首先对新型拼装式土工格室挡墙的施工方法进行介绍,采用新型玻璃钢轻质面板有效解决了挡墙线形不美观并容易破损的不足;其次,通过现场监测对该挡墙的支持效果进行分析,现场监测结果表明:该挡墙不同部位的土压力沿墙高呈非线性分布,底部大,顶部小,局部会出现土压力减小的现象;挡墙同一水平高度处墙背和墙中部土压力较大,而墙面处较小,说明土压力从墙中部到墙面范围内的衰减程度较大;对墙身水平位移的监测结果表明:水平位移曲线为“S”形,存在2个位移分界点,水平位移在截面形状改变处变化明显,挡墙顶部和底部的水平位移为最大值和最小值,分别为30 mm和3 mm;对挡墙的沉降监测结果表明:该挡墙填筑施工期沉降量较大,占总沉降量的70%~90%,工后沉降很小,墙体最大沉降发生在挡墙顶部,沉降最大值仅为23 mm。最后,结合土压力计算理论分析该台阶式截面挡墙的土压力分布和墙身变形规律,结果表明该挡墙变形符合“转动+平动+绕墙底转动”模式,采用该文计算方法得到的墙背土压力与实测值较为接近,用于挡墙设计时结果更偏安全。

关键词:拼装式挡墙;土工格室;新型面板;现场监测;位移模式;极限主动土压力

中图分类号:U417

文献标志码:A

Test and Analysis on Stress and Deformation of Assembled Geocell Retaining Wall

KONG Yongbo¹, LI Hao^{2*}, ZHANG Jianwei², LI Junjie¹, YANG Xiaohua²

(1.Survey and Design Company of Sichuan Road & Bridge (Group) Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610000, China;

2.School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: The variable cross-section geocell retaining wall of the Chengdu - Yibin Expressway test road in Sichuan Province of China was studied. First, the construction method of the new-type assembled geocell retaining wall was introduced, and the new-type glass fiber reinforced plastic lightweight panel was used to effectively solve the problem that the panel of the retaining wall is not neat and easy to be damaged. Secondly, the supporting effect of the retaining wall was analyzed by field monitoring. The field monitoring results show that the earth pressure at different parts of the retaining wall is nonlinearly distributed along the height of the retaining wall. The earth pressure at the bottom of the retaining wall is large, but it is small at the top and decreases locally. At the same height of the retaining wall, the earth pressure at the back and the middle of the retaining wall is larger, while that at the wall surface is smaller, indicating that the earth pressure attenuates greatly from the middle of the retaining wall to the wall surface. The monitoring results of the horizontal displacement of the wall show that the horizontal displacement curve is S-shaped, and there are two displacement demarcation points. The horizontal displacement changes obviously at the position where the wall section changes, and the horizontal displacement at the top and bottom of the retaining wall is the maximum and minimum, which are 30 mm and 3 mm, respectively. The settlement monitoring results of the retaining wall show that the settlement of the retaining

收稿日期:2023-04-24

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(编号:41807246)

作者简介:孔永博,男,大学本科,高级工程师.E-mail:25932113@qq.com

*通信作者:李浩,男,博士研究生.E-mail:18635439458@163.com

wall during the construction period is large, accounting for about 70%–90% of the total settlement, and the post-construction settlement is small. The maximum settlement of the wall occurs at the top of the retaining wall, and the maximum settlement is only 23 mm. Finally, the earth pressure distribution and deformation law of the stepped retaining wall are analyzed with the earth pressure calculation theory. The results show that the deformation of the retaining wall conforms to the mode of “rotation + translation + rotation around the bottom of the wall”. The earth pressure at the back of the retaining wall obtained by the calculation method in this paper is close to the measured value and is safer when it is used for retaining wall design.

Keywords: assembled retaining wall; geocell; new-type panel; field monitoring; displacement mode; limit active earth pressure

0 引言

近年来,人们本着环境友好、节约资源的理念,土工合成材料得到了很大的发展,且以土工格室为加筋材料的研究也越来越多^[1-2],将其应用于土体加固领域如护坡及边坡支挡也取得了很大进展。土工格室柔性挡墙是由土工格室和填料经过压实后按照一定坡率(1:0.25~1:0.75)层层叠置而成的挡土构造物^[3-4],结构轻,施工简便,外形美观,最大的特点是墙身可以变形,与土体变形协调,减缓局部应力集中现象^[5-8]。

与刚性挡墙相比,土工格室柔性挡墙不仅受力和变形模式更加复杂,而且破坏模式也更加多样,既可能出现挡墙内部的破坏,同时也会有墙后填土沿破裂面的滑动^[9-11],存在软土地基时甚至会出现深层的整体滑动^[12]。这是由柔性挡墙的材料特性所决定的,一方面柔性挡墙具有土工合成材料的特性,另一方面也包含土体的材料特性,两者的相互作用共同构成了具有一定刚度和强度的复合体,大大提升了散体材料的强度^[13-16]。在土工格室加固机理研究方面,彭艾鑫等^[17]和 Song 等^[18]对土工格室加固砂土的三轴剪切特性进行了研究;Li 等^[19]通过大型直剪试验研究了土工格室加固粉细砂结构层的抗剪强度特性;徐永福^[20]通过离散元方法研究了粗粒土在考虑颗粒破碎情况下的抗剪强度。可以发现,目前对土工格室加筋土的研究中,土样通常选取砂土等粗粒土,对粉细砂等颗粒较细的土样研究较少。

由于土工格室的存在,柔性挡墙具有加筋土挡墙的部分特点,且格室墙体又具有一定刚度,因此又拥有了类似于重力式挡墙的自重挡土能力,墙后填土的运动会使柔性挡墙墙身发生变形,作用于墙背

的土压力大小及分布也会随墙身的变形而改变。在柔性挡墙土压力研究方面,芮瑞等^[21-22]对桩承式加筋路堤挡墙三维土压力进行了研究,分析了在填料土拱效应下挡墙土压力随埋深变化特征;李伟等^[23]对砂袋挡土墙的承载力特性进行了分析,研究了砂袋挡墙墙背及墙内土压力分布规律;应宏伟等^[24]研究发现柔性挡墙墙背土压力为“R”形分布,李镜培等^[25]根据土体的渐进破坏机制,建立了非极限状态下改进的库仑土压力公式;屈战辉等^[26]结合土工格室柔性挡墙水平变位特征与位移模式,以挡墙中间鼓出最大点处为分界点,认为分界点以上墙体发生水平位移,土压力可按库仑主动土压力计算,分界点以下的土压力按绕墙底转动的位移模式计算,给出土工格室柔性挡墙极限主动土压力计算方法。

土工格室柔性挡墙优点突出,目前已经得到较为广泛的应用,其中具有代表性的项目包括位于312国道甘肃凤(口)—罗(汉洞)公路某跨沟路段的土工格室加固的黄土挡墙,108国道祁临高速公路连接线柔性挡墙,厦门国道319改线工程海沧路段土工格室挡墙,挡墙高度均超过10 m,并都取得了良好的实用效果和经济效益。虽然人们对柔性挡墙的认识和应用均取得了一定进展,但是对以粉细砂为填料的柔性挡墙研究尚少,尤其是台阶式截面的拼装式土工格室柔性挡墙,对其受力变形机理及施工技术的研究尚未完善。因此,本文以成宜高速连接线某粉细砂为填料的柔性挡墙为工程依托,通过现场施工对柔性挡墙的施工工序进行研究及完善,根据现场监测结果对其受力和变形机理进行分析,结合挡墙水平变位特征采用水平微分单元法计算墙背主动土压力,并与实测值比较,分析结果可为柔性挡墙的设计计算与施工提供参考。

1 拼装式土工格室挡墙

该土工格室柔性挡墙工程位于四川省自贡市荣县成宜高速公路连接线,属四川盆地,地形以低山丘陵为主,平均海拔 200~500 m。气候温和,属于亚热带湿润气候,地势低,雨雾大,湿度高,降雨丰富,年降水量在 1 000 mm 以上,雨季集中于夏季,多发暴雨,地层岩性较差且分布不均,地震、地面塌陷、崩塌、滑坡、泥石流等灾害发生频率较高,为保障公路施工及运营的安全,应对路基边坡进行支挡加固,支挡方案采用拼装式土工格室挡墙。柔性挡墙示意图如图 1 所示。

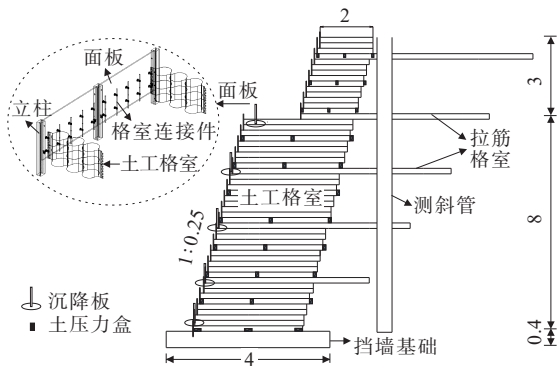


图 1 柔性挡墙示意图(单位:m)

Figure 1 Flexible retaining wall(unit:m)

柔性挡墙总高度为 11 m,为防止上覆压力造成墙身挠度过大,挡墙设计采用台阶式截面,台阶以上部分高度为 3 m,墙宽 $B_1=2$ m,台阶以下墙高为 8 m,墙宽 $B_2=4$ m,每隔 2 m 高度布设一条拉筋格室,以增强墙体的稳定性。挡墙由土工格室、面板、填土和基础四部分组成,前三者共同构成墙体部分。土工格室焊距为 400 mm,高度 20 cm,片材原材料为高密度聚乙烯,密度为 $0.935\sim 0.965\text{ g/cm}^3$,拉伸屈服强度为 22.9 MPa($>20\text{ MPa}$),环境应力开裂为 833 h,低温脆化温度为 $62.4\text{ }^\circ\text{C}$,维卡软化温度为 $120\text{ }^\circ\text{C}$,氧化诱导时间为 80 min,厚度为 1.75 mm,表面纹理粗糙,能增加与填料之间的摩擦力。

目前对于土工格室柔性挡墙的面板研究尚不成熟,根据前人的经验成果,一部分挡墙不设面板,还有一部分以大型格室填土作为墙身面板,这种做法首先不能保证墙体格室的安全,使其容易受到风吹雨淋从而加速老化,其次也不美观。针对以上问题,本文研制轻质、高强、耐腐的新型玻璃钢面板,解决

格室暴露和欠美观的不足,面板包括立柱、格室连接件,面板结构被固定于墙体外缘形成墙面,如图 2 所示。面板的技术指标如表 1 所示。



图 2 玻璃钢轻质面板

Figure 2 Glass fiber reinforced plastic lightweight panel

表 1 玻璃钢面板材料技术指标

Table 1 Technical parameters of glass fiber reinforced plastic panel material

检验项目	单位	技术指标	试验方法
外观		试样平整、无弧线变形;保护膜完好无撕裂、褶皱等;没有明显色差、杂质、波纹、条纹、裂纹、划伤、气孔、严重凹凸等缺陷	GB/T 22789.1—2008
密度	g/cm^3	0.90~0.93	GB/T 1033.1—2008
拉伸强度	MPa	横向 ≥ 83 纵向 ≥ 127	GB/T 1449—2005
断裂伸长率	%	横向 ≥ 12	GB/T 1447—2016

格室填料为当地的粉细砂土,主要粒径集中于 0.25~0.075 mm,质量占比 44.06%,有效粒径为 0.02 mm,中间粒径为 0.09 mm,不均匀系数 $C_u=12.42$,曲率系数 $C_c=2.4$ 。击实试验结果表明:该粉细砂的最大干密度为 $\rho_{\text{dmax}}=1.82\text{ g/cm}^3$,最佳含水率为 $w_{\text{op}}=12.1\%$ 。

2 现场施工与监测方案

2.1 柔性挡墙的施工

2.1.1 基础施工

柔性挡墙基础施工主要包括测量放线、支模板、混凝土浇筑和养护几个步骤。基础采用 C20 混凝土进行浇筑,高度 40 cm,长度 10.3 m,宽度 5 m。在基础浇筑时,应预埋面板的立柱和一定数量的钢筋头,便于铺设第一层土工格室时以撑开固定格室的四周。需要注意的是,为了保证挡墙的安全,基础外边

缘应与平台坡面线留有足够的安全距离,保证襟边宽度 ≥ 1.5 m,现场的襟边宽度为2 m。

2.1.2 墙身施工

墙身施工工序包括面板施工和铺设格室两个主要步骤。安装面板时首先对面板位置放线并控制好第一层面板的标高,定好位置后埋设面板的立柱,立柱总长80 cm,埋入土中20 cm,固定好面板立柱后,将面板插入相邻的立柱之间,操作简便快捷。

当面板固定好后,将土工格室一端与面板进行连接,面板背部安装有与格室进行连接的连接件,通过销钉将二者连接在一起,连接件和销钉如图3所示。随后将土工格室整体展开并固定四角,方便后续填土压实,两幅格室之间通过U形钩进行固定,连接完成后用装载机进行填土摊铺。



图3 面板与格室间的连接

Figure 3 Junction between panel and geocell

2.1.3 碾压压实

装载机填土时将松铺厚度控制在25 cm左右,填土中不能有粒径大于8 cm的石块,否则容易对格室造成破坏。碾压时压路机采用22 t钢轮振动压路机,压实度要求不低于93%,压实速度2~4 km/h。需要注意的是,在距离面板1 m附近不能使用大型振动压实设备,以免造成面板鼓包破坏。碾压工序完成后对压实度进行检测,合格后方可进行下一层格室的铺设,按照一定的坡度逐层向上施工,直到挡墙完成,挡墙完工后的整体外观如图4所示。



图4 柔性挡墙现场图

Figure 4 Flexible retaining wall on site

2.2 现场监测方案

试验设置2个监测断面,共埋设土压力盒64个,沉降板10个,现场钻取2个测斜孔用于埋设测斜管,监测元件的布设方案如图1所示。土压力的测量采用TYJ-2020型、量程为0.2 MPa、分辨力 $\leq 0.05\%$ FS、综合误差 $\leq 1.0\%$ FS的振弦式土压力盒。埋设土压力盒时应注意最底层压力盒横向埋置,测量挡墙墙底竖向压力。其余压力盒侧向埋置,压力盒受力面正对墙背土体,测量挡墙水平土压力。埋设后注意将填土压实,防止出现脱空现象,并且在压力盒的周围用细砂或者小粒径砂土(粒径不大于3 mm)填充,防止因局部应力过大或者土的固结问题影响压力盒的读数。由于部分挡墙测点与适宜测量位置距离较远,压力盒引线较长,因此在测量过程中需要将引线放入测量导管中,便于保护。

挡墙背部的水平位移监测采用测斜仪,测斜孔深根据现场天然土层分布情况确定为12 m,沉降观测点从挡墙底部开始布设,每个沉降板之间的垂直间距为2 m,共埋设5个沉降板。根据施工周期及柔性挡墙变形特点,监测频率如表2所示。

表2 现场监测频率

Table 2 Monitoring frequency of field test

测试阶段	观测频次	
挡墙施工中	一般情况	1次/d
	发生突变	2次/d
挡墙施工完成	第一个月	1次/周
	一个月后	1次/月

3 试验结果分析

现场监测分为土压力监测、挡墙墙背水平位移监测和墙身的沉降监测3部分,监测周期包括挡墙的建设期及施工完成后一段时间的稳定期。

3.1 土压力监测结果

挡墙底部竖向土压力变化曲线如图5所示,从施工开始随着挡墙逐渐填高,挡墙底部土压力逐渐升高,曲线在2020年8月31日到9月19日期间斜率明显较大,是因为此期间的柔性挡墙施工进度较快,填土高度增长迅速,路基部分施工期结束后曲线变化放缓,随着后续路面施工的开展,挡墙底部土压力增长变慢,截至2020年10月29日,挡墙底部竖向土压

力最大值为 189 kPa。

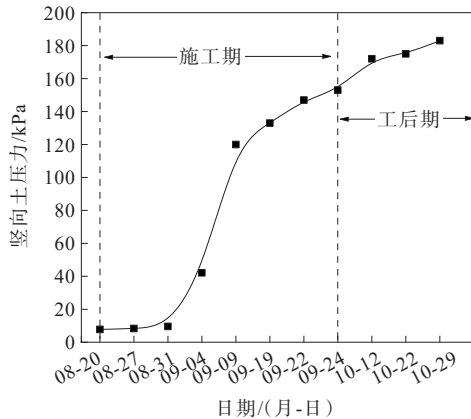


图5 挡墙底部竖向土压力(2020年)

Figure 5 Vertical earth pressure at the bottom of retaining wall(year 2020)

为研究柔性挡墙水平土压力在挡墙不同高度处的规律,本文自下而上选取墙高为 1 m、4 m 和 9 m 共 3 个高度处的水平土压力进行研究。挡墙墙高 1 m 处墙背处、墙中部和墙面处水平土压力的变化规律如图 6 所示。

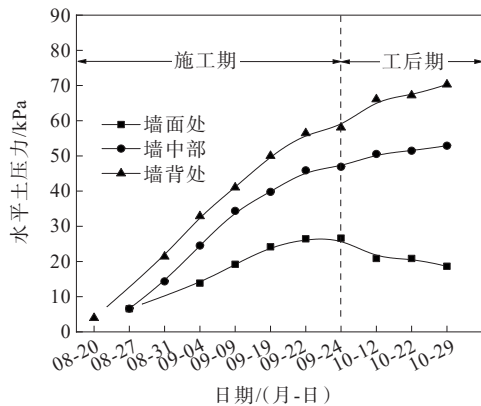


图6 墙高 1 m 处水平土压力随时间变化曲线(2020 年)

Figure 6 Variation of horizontal earth pressure at wall height of 1 m over time(year 2020)

由图 6 可知:截至 2020 年 10 月 29 日,墙背处土压力为 70.31 kPa,墙中部土压力为 52.93 kPa,墙面处土压力为 18.63 kPa,墙面处土压力明显小于墙背和墙中部,说明柔性挡墙土压力在由墙背向墙面的传递过程中发生了衰减,土压力主要集中于墙背和墙中部,在墙身的前半部分衰减程度很大。与挡墙底部竖向土压力变化规律相同,水平土压力在施工期增长速度较快,挡墙施工完成后水平土压力曲线变得平缓,墙后填土逐渐向挡墙运动,由于柔性挡墙具

有一定的变形能力,挡墙和填土之间相互作用直到变形协调,土压力逐渐稳定且能减缓局部应力集中现象。

挡墙墙高 4 m 处水平土压力变化规律如图 7 所示,与墙底水平土压力的变化规律相同,墙面处土压力明显偏小,仅为 12.72 kPa,墙中部和墙背部的水平土压力分别为 30.35 kPa 和 41.33 kPa。墙高 9 m 处的土压力分布规律如图 8 所示,相较于挡墙底部和墙高 4 m 处,由于土的自重应力较低,且无附加荷载作用于挡墙顶部,因此整体呈现的土压力数值很小,墙背处土压力为 17.32 kPa,墙中部土压力为 13.04 kPa,墙面处土压力为 6.25 kPa,而墙面处土压力偏小还有一个原因是压实度的问题,由于靠近面板位置不适宜采用大型压路机等压实机械,因此压实度较挡墙中部和背部略低,水平土压力值也较小。

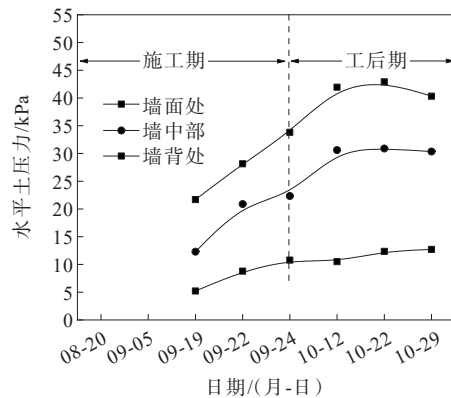


图7 墙高 4 m 处水平土压力随时间变化曲线(2020 年)

Figure 7 Variation of horizontal earth pressure at wall height of 4 m over time(year 2020)

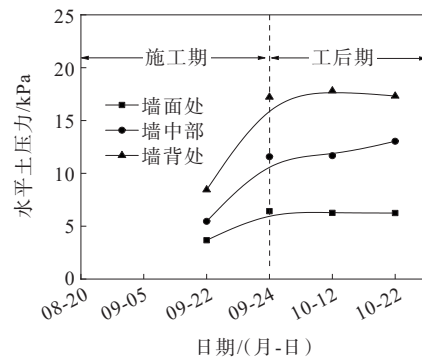


图8 墙高 9 m 处水平土压力随时间变化曲线(2020 年)

Figure 8 Variation of horizontal earth pressure at wall height of 9 m over time(year 2020)

柔性挡墙不同监测部位土压力沿墙高分布如图 9 所示。可见,墙背处的土压力最大,墙面处的土压

力最小,墙中部的土压力介于两者之间。土压力沿高度分布表现为明显的非线性,总体呈现底部大、顶部小的特点,局部出现土压力减小的现象,这是因为在水平土压力作用下,柔性挡墙中下部发生鼓胀变形,墙后土体与挡墙变形协调,引起土压力减小,墙背土压力曲线形状近似于“R”形。

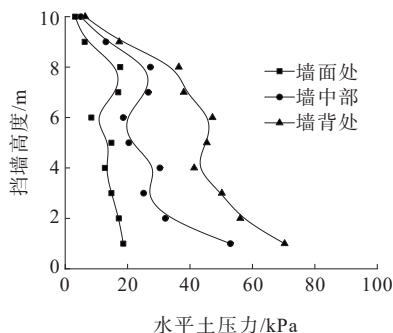


图9 柔性挡墙水平土压力沿墙高分布曲线

Figure 9 Distribution curve of horizontal earth pressure along the height of flexible retaining wall

3.2 水平位移监测结果

墙身水平位移监测结果如图10所示。

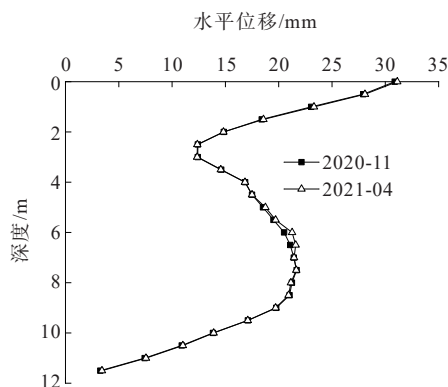


图10 柔性挡墙水平位移监测结果

Figure 10 Monitoring results of horizontal displacement of flexible retaining wall

结果表明:2020年11月到2021年4月之间,墙身的水平位移变化很小,两次监测结果十分接近,说明柔性挡墙状态十分稳定。墙身位移沿墙高分布为“S”形曲线,孔顶部的位移最大,底部的位移最小,从孔顶到深度3 m附近,墙身变形接近线性,水平位移由30 mm($\leq 3\%B_1$)减小到13 mm,在深度3 m以下位移又逐渐增大,深度7 m时达到第2个最大值,此时对应的墙身水平位移为22 mm($\leq 3\%B_2$),深度7 m以下,位移又逐渐减小到3 mm,以 $3\%B$ (B 为墙宽)为限度,墙身水平位移量均在允许范围内。

通过对墙身水平位移的分析,可以发现柔性挡墙的水平位移并非简单的平移或者线性变形,而是较为复杂的非线性变形。由于柔性挡墙的截面形式为台阶式,因此在截面尺寸变化处,即深度3 m附近位移出现拐点,这是台阶上部墙身宽度较小时,墙身在水平土压力作用下发生较大的挠曲变形和平移,考虑路基部分完工后,压路机等重型设备在路基顶面行走碾压,土体会向墙面方向移动,因此孔顶部分的位移也明显较大。而3 m以下的墙体变形呈现鼓肚子形状,这是柔性挡墙墙后土压力随墙身变形重新分布,墙体刚度较低,墙身允许变形的结果。柔性挡墙土压力和墙身变形之间的关系十分紧密,墙身一旦变形,墙后土压力相应也会改变,与刚性挡墙相比,柔性挡墙的变形模式和土压力分布更为复杂。较大的墙体竖向自重压力作用限制了挡墙底部墙身的侧向位移,同时格室与粉细砂填料所形成的格室结构层有更高的压实度及模量,故在墙后水平土压力的作用下,底部墙身位移较小。

3.3 墙身沉降结果

观测点的埋设是随着路基和挡墙的填筑一起进行的,沉降监测通过埋设沉降板并使用全站仪进行观测,监测周期从2020年8月15日持续到2020年10月30日。观测结果如图11所示。

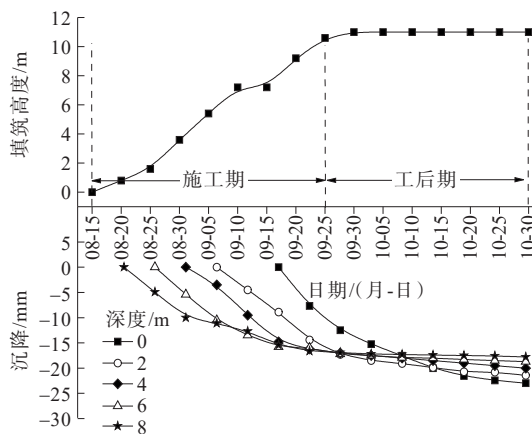


图11 柔性挡墙沉降观测结果(2020年)

Figure 11 Settlement monitoring results of flexible retaining wall(year 2020)

由图11可以看出:挡墙填筑初期沉降量较大,随着填筑进行,格室填料逐渐被压实,沉降随之减小,9月底路基填筑基本结束,沉降也趋于稳定。2020年10月到2021年4月以来,挡墙沉降量变化很小,挡墙

和路基保持稳定。

分析监测结果可以发现:2 m、4 m、6 m、8 m 深度处墙身在施工期(至9月底)已经完成总沉降量的70%~90%,0 m 深度处的挡墙填筑时间晚,至9月底墙身沉降尚未稳定。墙身最大沉降量发生在挡墙顶部,由于格室对土体的三维加固作用,最大沉降值较小,约为23 mm。三维土工格室能有效扩散上部荷载,通过侧壁的摩擦和环向约束作用对土体进行加固,摩擦作用表现为土工格室和填料共同受力时,两者的模量不同,因此会导致两者不同的变形,这种相对运动趋势会在土工格室壁上产生摩擦力,对土体进行约束,并且相邻格室之间受到的水平力大小相等、方向相反,从而互相抵消,因此土体上方作用的实际荷载被削弱,使得沉降减小。

3.4 台阶式截面柔性挡墙受力变形模式分析

墙背极限主动土压力是土工格室挡墙的断面设计与稳定验算的一个重要荷载,理论计算方法多采用库仑主动土压力计算法以及水平微分单元法等,其中库仑解假定主动土压力沿挡墙高度呈线性分布,没有反映柔性挡墙变形对土压力的影响。采用水平微分单元法并结合土工柔性挡墙水平变位特征,将墙体分段计算土压力能得到更好的结果^[26]。具体方法是:将墙体的位移模式简化为平动和绕墙底转动的组合模式,以中间鼓出最大点处为分界点,认为分界点以上墙体发生水平位移,土压力可按库仑主动土压力计算,分界点以下的土压力按绕墙底转动的位移模式计算,从而给出墙背水平土压力计算公式。

结合本文中台阶式截面柔性挡墙的实测位移曲线(图10),可以发现:从墙顶开始往下3 m 范围内位移近似为线性分布,且在墙顶处达到最大值,可将此段位移模式视为绕上台阶底部拉筋格室的转动,整个台阶上部的柔性挡墙高度较小,在路基顶面荷载作用下最上方的格室被挤出;随后位移在3~7 m 内逐渐增加,7~8 m 范围内存在鼓出最大点,因此可将3~7 m 视为平动模式;在7 m 深度以下,墙体位移呈线性分布,可视为绕墙底的转动。根据水平微分单元法计算墙背土压力,挡墙坡角为76.5°,土体重度为18.2 kN/m³,土体内摩擦角为31°,将3 m 和7 m 深度处作为两个位移分界点,采用“转动+平动+绕墙底转动”位移组合模式,转动模式下土压力计算以文献

[26]中 P_x 的求解为基础,平动模式按照库仑解计算主动土压力,并在分界点处考虑应力连续,结果如图12所示。对比等截面及台阶式截面挡墙土压力计算值可以发现,两者均接近于实测值,曲线形态接近,局部土压力随深度减小,台阶式截面挡墙土压力计算值略大于实测值,这是因为柔性挡墙实际工作状态下会发生挠曲变形引起土压力的减小;两者计算值的差异在于墙体截面不同引起墙体水平变位特征不同,等截面挡墙计算时采用的是“平动+绕墙底转动”组合变形模式;挡墙设计时通常根据库仑解,采用台阶式截面挡墙土压力计算结果进行挡墙设计更加保守和安全,可在满足挡墙抗滑及抗倾覆稳定性的基础上根据土压力大小进一步合理设计挡墙上下台阶墙宽或在土压力较大处设置拉筋格室以兼顾经济效益。

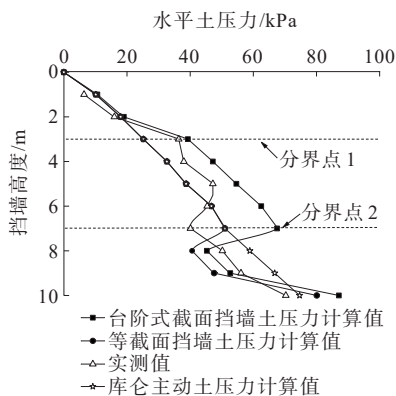


图12 柔性挡墙实测墙背水平土压力实测值与理论计算值
Figure 12 Measured and theoretically calculated values of horizontal earth pressure at the back of flexible retaining wall

4 结论

依托成宜高速某段拼装式土工格室挡墙施工项目,对挡墙不同部位的位移及土压力进行监测,把实测结果与理论计算结果对比分析后得到柔性挡墙的墙身变形和土压力分布规律,具体结论如下:

(1) 同一高度处,拼装式土工格室挡墙水平土压力:墙背部>墙中部>墙面处,土压力由墙背向墙面传递过程中发生了衰减,在墙中部到墙面处的衰减程度很大,挡墙墙背、墙中和墙面处的土压力沿墙高为非线性分布,总体呈现底部大顶部小的特点,且局部出现土压力减小的现象,墙背土压力曲线近似于

“R”形。

(2) 拼装式土工格室挡墙水平位移曲线为“S”形,截面改变处以上部分位移呈线性,以下部分位移随深度变化曲线呈鼓肚子形状,挡墙顶部位移最大,最大值为30 mm,墙底位移最小,仅为3 mm,水平位移均在挡墙允许变形范围内。

(3) 挡墙填筑初期沉降量较大,早期填筑的挡墙在施工期(至9月底)已完成总沉降量的70%~90%。墙身最大沉降发生在挡墙顶部,最大沉降值较小,约23 mm,这是由于土工格室结构层能扩散墙身上部荷载,发挥的侧限和摩擦作用可有效抑制墙身沉降。

(4) 考虑挡墙实际水平变位特征,台阶式截面挡墙采用“转动+平动+绕墙底转动”的组合位移模式时求得的墙背极限主动土压力接近实测值,并且略大于库仑解和等截面挡墙土压力计算值,按此结果进行挡墙设计更加保守和安全,可在满足稳定验算时合理设计墙宽以达到经济目的,同时,可对如何考虑挡墙实际位移量的大小对墙背土压力的影响来设计挡墙截面进行进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] 耿大新,杨泽晨,王宁,等.基于加筋路基中筋材应力性状的土工格室改进铺设方法[J].科学技术与工程,2021,21(23):10046-10053.
GENG Daxin, YANG Zechen, WANG Ning, et al. Improved laying method of geocell based on stress behavior of reinforcement in reinforced roadbed[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23): 10046-10053.
- [2] 张文海,侯森磊,王家全,等.土工格室加筋土挡墙大模型静动载试验研究[J].中外公路,2022,42(5):6-11.
ZHANG Wenhai, HOU Senlei, WANG Jiaquan, et al. Research on static and dynamic mechanical test of large-scale model of geocell-reinforced earth retaining wall[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(5): 6-11.
- [3] 杨晓华,钱德成,谢永利.土工格室工程性状及应用[M].北京:科学出版社,2020.
YANG Xiaohua, QIAN Decheng, XIE Yongli. Engineering characteristics and application of geocell[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [4] 田林,李宁,王宇,等.土工格室形式与填料类型对公路地基承载力的影响[J].中外公路,2022,42(2):15-23.

- TIAN Lin, LI Ning, WANG Yu, et al. Influence on the type of geocell and filler on bearing capacity for highway road subgrade[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(2): 15-23.
- [5] 王启龙,杨晓华,晏长根.路肩式土工格室柔性挡墙受力及变形分析[J].铁道科学与工程学报,2017,14(5):980-987.
WANG Qilong, YANG Xiaohua, YAN Changgen. Analysis of the stress and deformation characteristics of geocell flexible retaining wall for subgrade shoulders[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(5): 980-987.
- [6] 王龙飞,陈浩,程瑞志,等.多级土工格室柔性挡墙变形特性数值模拟[J].路基工程,2015(4):176-179.
WANG Longfei, CHEN Hao, CHENG Ruizhi, et al. Numerical simulation on deformation behavior of multilevel geocell flexible retaining wall[J]. Subgrade Engineering, 2015(4): 176-179.
- [7] 宋飞,许伟强,张鲁渝,等.土工格室柔性挡墙变形规律数值模拟研究[J].岩土力学,2011,32(S1):738-742.
SONG Fei, XU Weiqiang, ZHANG Luyu, et al. Numerical simulation study on deformation law of geocell flexible retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 738-742.
- [8] 吴方伯,张高波,欧阳靖,等.免模剪力墙抗震性能试验[J].建筑科学与工程学报,2019,36(1):22-31.
WU Fangbo, ZHANG Gaobo, OUYANG Jing, et al. Experiment on seismic behavior of non-formwork shear wall[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(1): 22-31.
- [9] 苗满胜,刘军.不同设计参数下土工格室柔性挡墙受力及变异性分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(4):125-130.
MIAO Mansheng, LIU Jun. Stress and deformation analysis in geocell flexible retaining wall with different design parameters[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018, 16(4): 125-130.
- [10] 印长俊,舒亮,潘婷,等.基于渐进均匀化方法的土工格室材料设计与应用[J].铁道科学与工程学报,2019,16(4):900-906.
YIN Changjun, SHU Liang, PAN Ting, et al. Design and application of geocell material based on asymptotic homogenization method[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(4): 900-906.
- [11] 陈建峰,田丹,柳军修.刚/柔性组合墙面加筋土挡墙内部破坏机制[J].岩土力学,2018,39(7):2353-2360.
CHEN Jianfeng, TIAN Dan, LIU Junxiu. Internal failure mechanism of reinforced soil walls with rigid/flexible

- facings[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(7): 2353-2360.
- [12] 何燕清. 软土地基上加筋土挡墙的性能研究[D]. 福州:福州大学, 2013.
- HE Yanqing. Performance of reinforced soil-retaining wall on soft soil foundation[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2013.
- [13] 杨广庆, 左政, 刘英, 等. 土工格室条带拉伸力学特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(4): 760-767.
- YANG Guangqing, ZUO Zheng, LIU Ying, et al. Experimental investigations on tensile mechanical properties of geocell strips[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(4): 760-767.
- [14] 郑俊杰, 苗晨曦, 张军, 等. 土工格栅与砂土接触界面细观特性离散元研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(7): 5-9.
- ZHENG Junjie, MIAO Chenxi, ZHANG Jun, et al. Study on mesoscopical properties of interface between geogrid and sand by DEM[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 41(7): 5-9.
- [15] 晏长根, 顾良军, 杨晓华, 等. 土工格室加筋黄土的三轴剪切性能[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(10): 17-24.
- YAN Changgen, GU Liangjun, YANG Xiaohua, et al. Triaxial shear property of geocell-reinforced loess[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(10): 17-24.
- [16] CHEN R H, HUANG Y W, HUANG F C. Confinement effect of geocells on sand samples under triaxial compression[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, 37: 35-44.
- [17] 彭艾鑫, 张孟喜, 朱华超. 高强土工格室加筋砂土性状的三轴试验[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2017, 23(4): 590-599.
- PENG Aixin, ZHANG Mengxi, ZHU Huachao. Triaxial test of high strength geocell reinforced soil[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2017, 23(4): 590-599.
- [18] SONG F, JIN Y T, LIU H B, et al. Analyzing the deformation and failure of geosynthetic-encased granular soil in the triaxial stress condition[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2020, 48(6): 886-896.
- [19] LI H, YANG X H, ZENG H, et al. Shear plane characteristics of geocell-reinforced fine sand through direct shear test[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(21): 2226.
- [20] 徐永福. 基于颗粒破碎的粗粒土剪切强度的模拟分析[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(6): 1409-1414.
- XU Yongfu. PFC^{2D} simulation of rockfill shear strength based on particle fragmentation[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1409-1414.
- [21] 芮瑞, 翟玉新, 王磊, 等. 桩承式挡墙路堤三维土压力分布与变形特性试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(3): 590-606.
- RUI Rui, ZHAI Yuxin, WANG Lei, et al. Experimental investigation of three-dimensional earth pressure distribution and deformation patterns of piled embankments with retaining wall[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(3): 590-606.
- [22] 芮瑞, 万亿, 陈成, 等. 加筋对桩承式路堤变形模式与土拱效应影响试验[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(1): 41-50.
- RUI Rui, WAN Yi, CHEN Cheng, et al. Experimental investigation on influences of geosynthetic reinforcement on deformation pattern and soil arching in piled embankments[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(1): 41-50.
- [23] 李伟, 耿莹莹, 李福栋, 等. 砂袋挡土墙宽度对承载特性影响的试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(36): 279-289.
- LI Wei, GENG Yingying, LI Fudong, et al. Experimental study on the effect of sandbag retaining wall widths on the bearing characteristics[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(36): 279-289.
- [24] 应宏伟, 朱伟, 郑贝贝, 等. 柔性挡墙的主动土压力计算及分布研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(S2): 1-6.
- YING Hongwei, ZHU Wei, ZHENG Beibei, et al. Study on calculation and distribution of active earth pressure of flexible retaining wall[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(S2): 1-6.
- [25] 李镜培, 马原, 饶平平. 考虑位移的柔性挡墙上土压力计算[J]. *岩土力学*, 2012, 33(10): 2937-2941.
- LI Jingpei, MA Yuan, RAO Pingping. Calculation of earth pressure against flexible retaining wall considering displacement[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(10): 2937-2941.
- [26] 屈战辉, 谢永利, 袁福发, 等. 土工格室柔性挡墙极限主动土压力计算方法[J]. *交通运输工程学报*, 2010, 10(1): 24-28, 35.
- QU Zhanhui, XIE Yongli, YUAN Fufa, et al. Calculation method of active earth pressure under limit state for geocell flexible retaining wall[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2010, 10(1): 24-28, 35.